Über die natürliche und künstliche Brandzone der Meteoreisen und das Verhalten der „Neumann'schen Linien" im erhitzten Kamacit

von

Friedr. Berwerth, k. M. k. Akad., und **G. Tammann.**

(Mit 1 Tafel und 1 Textfigur.)

(Vorgelegt in der Sitzung am 19. Jänner 1911.)

Über das Verschwinden der Neumann'schen Linien in erhitztem Kamacit bei verschiedenen Zeiten und Temperaturen.

Nach Untersuchungen von Linck[1] und Mügge[2] liegt auf den Gleitflächen, die den Neumann'schen Linien entsprechen, eine Zwillingslamelle. Auf dem Streifen, in dem diese Zwillingslamelle von der polierten Fläche des Kamacits geschnitten wird, bildet sich beim Ätzen ein Kanal: die Neumann'sche Linie; es ist also offenbar die Lösungsgeschwindigkeit der Zwillingslamelle, deren Moleküle sich in einem Zwangszustand befinden, größer als die der umgebenden natürlichen Kamacitmasse. Der Zwangszustand in der Zwillingslamelle wird dahin streben, sich mit der Zeit auszugleichen, und zwar mit einer Geschwindigkeit, welche in hohem Maße von der Temperatur abhängen wird.

Durch folgende Versuche haben wir gesucht, uns über jene Geschwindigkeit und ihre Abhängigkeit von der Temperatur näher zu orientieren, indem wir Platten aus einem und demselben Kamacit des Eisens von Mount Joy, der vor dem Erhitzen die Neumann'schen Linien in schönster Deutlichkeit

---

[1] G. Linck, Zeitschrift für Kryst., 20, p. 209 (1892).

[2] O. Mügge, Neues Jahrbuch f. Min., 1899 [2], p. 63.

zeigte, verschiedene Zeiten lang auf bestimmte Temperaturen erhitzten und die Ätzbilder auf den nach dem Erhitzen wieder polierten Flächen untereinander und mit den ursprünglichen Ätzbildern verglichen.

Resultate der Versuche. Zu den Versuchen wurden Plättchen nach den Würfelflächen des Kamacits aus dem Meteoreisen von Mount Joy geschnitten und poliert. Diese Plättchen waren etwa 1 *cm* lang, 0·5 *cm* breit und 0·2 *cm* dick. Nach dem Ätzen der polierten Fläche mit dreiprozentiger Salpetersäure während 3 Minuten traten im unveränderten Kamacit die Neumann'schen Linien mehrerer Systeme in deutlichster Ausbildung hervor. Die meisten Kamacitplättchen enthielten zahlreiche Rhabditnädelchen.

Die Erhitzung bei 870° C. wurde in der Weise ausgeführt, daß man das Kamacitplättchen in ein auf ungefähr 870° im Sandbad erhitztes Porzellanrohr für eine bestimmte Zeit einführte; die Temperatur des Bades wurde allerdings vom Kamacitplättchen nicht sofort angenommen, wodurch besonders bei den kurze Zeit exponierten Plättchen große Unsicherheiten betreffs der wahren Expositionsdauer auftreten. Für orientierende Versuche war aber diese Art der Exposition genügend. Die Erhitzung auf 800°, welche nur kurze Zeit währte, wurde im geschmolzenen KCl vorgenommen, wodurch die Expositionsdauer bestimmter wurde. Ein Bad aus 75% Na_2SO_4 und 25% NaCl hat den Vorzug, daß es über ein größeres Temperaturintervall brauchbar ist, doch greift dieses Bad den Kamacit so stark an, daß er sich nach der Erhitzung in diesem Bade sehr schlecht ätzt.

1. Temperatur zirka 876° C. 5 Sekunden erhitzt. Eine merkliche Veränderung des Kamacits ist nicht zu konstatieren, die Neumann'schen Linien sind sehr deutlich entwickelt. Spuren von durch Erhitzung entstandener Körnung des Kamacits sind nicht nachzuweisen.

2. Temperatur zirka 886° C. 15 Sekunden erhitzt. Der größte Teil der Neumann'schen Linien ist noch erhalten, wenn auch dieselben nicht mehr so breit wie im nicht erhitzten Kamacit sind. Ein Teil der Linien erreicht aber die Ränder des Plättchens nicht mehr. In der Nähe des Randes finden sich Inseln,

in denen die Körnung des Kamacits beginnt; in diesem Teil sind die Linien fast verschwunden.

3. Temperatur zirka 878° C. 1 Minute erhitzt. Die Körnung des Kamacits ist bemerkbar, die Linien sind noch schmäler geworden und kaum eine Linie ist in ihrem ganzen Verlauf zu verfolgen. Häufig sind Stücke der Linien durch vereinzelte Ätznäpfchen angedeutet. Die Rhabdite sind noch als solche erhalten.

4. Temperatur zirka 869° C. 10 Minuten erhitzt. An wenigen Stellen sind noch die Reste der Linien zu erkennen. Die Körnung hat sich stark entwickelt, ein Teil der Rhabditnadeln hat sich zwischen die Körner geschoben und bildet an vielen Stellen ihre Umgrenzung.

5. Temperatur zirka 866° C. 30 Minuten erhitzt. Die Linien sind an wenigen Stellen noch in Resten vorhanden wie beim Versuch 4. Die Rhabditnadeln sind als solche verschwunden und umgeben nun jedes Korn des veränderten Kamacits, was bei 70facher Vergrößerung deutlich, noch schöner aber bei 300facher Vergrößerung zu erkennen ist.

Die erste Veränderung, welche im Kamacit wahrzunehmen ist, besteht darin, daß die Neumann'schen Linien durch das Ätzmittel nicht mehr in ihrer ursprünglichen Breite und Tiefe hervorgerufen werden. Die diesen Linien entsprechende Störung im Raumgitter scheint also bei der Erhitzung zuerst sich auszugleichen. Ein Teil der Linien und besonders Teile der resistenteren Linien erwiesen sich aber von einer beachtungswerten Resistenz, ihre Spuren sind noch nachweisbar, nachdem der Kamacit schon aufgehört hat als solcher zu existieren, indem er durch volle Ausbildung seiner Körnung in das technische Nickeleisen übergegangen ist. Hieraus hat man wohl zu schließen, daß auf den resistenteren Linien nach Bildung derselben noch andere Prozesse, z. B. eine unmerklich schwache Oxydation, vor sich gegangen ist, wodurch die große Differenz in der Geschwindigkeit, mit der die Linien verschwinden, verständlich wird. Die Körnung des Kamacits kommt nach früheren [1]

[1] F. Berwerth, Diese Sitzungsberichte, Bd. 114, Abt, I, p. 343 (1905), und W. Fraenkel und G. Tammann, Zeitschr. f. anorg. Chemie, Bd. 60, p. 416 (1908).

Beobachtungen dadurch zustande, daß von zahlreichen Punkten des Kamacits aus die Umwandlung desselben in das technische Nickeleisen eintritt; indem von diesen Punkten aus die Umwandlung fortschreitet, bilden sich die kleinen Polyeder des technischen Nickeleisens, welche schließlich so regelmäßig von der Masse der ursprünglich vorhandenen Rhabditnädelchen umhüllt werden. Daß während dieser Umwandlung, der Körnung des Kamacits, die den Neumann'schen Linien entsprechenden Gleitflächen verschwinden, war zu erwarten; es scheint aber, daß diese Zwillingslamellen größtenteils schwinden, bevor der Übergang in das technische Nickeleisen sich bemerkbar macht. Für beide Prozesse ist eine gewisse Beweglichkeit der das Raumgitter besetzenden Moleküle notwendig; während die durch Gleitung hervorgerufene Störung sich ausgleicht, beginnt eine neue Störung im Kamacit, nämlich die Umwandlung desselben in technisches Nickeleisen. Beide Vorgänge verlaufen offenbar unabhängig voneinander; jedenfalls ist die Gleitfläche nicht der Ort einer besonders früh auftretenden Körnung.

Um über den Einfluß der Temperatur auf die Geschwindigkeit des Verschwindens der Neumann'schen Linien und die des Auftretens der Körnung eine Orientierung zu gewinnen, wurden folgende beide Versuche angestellt:

6. Temperatur zirka 800° C. 1 Minute lang durch Eintauchen in ein KCl-Bad erhitzt. Die Körnung des Kamacits ist eingetreten, ein Teil der Linien ist noch vorhanden, die Rhabdite sind als solche vorhanden.

Nun vergleiche man die beiden Kamacite nach den Erhitzungen 3 und 6. Die erste Erhitzung hatte 1 Minute lang im Luftbade, die zweite 1 Minute lang im KCl-Bade gedauert; bei der ersten hatte wegen der schlechteren Wärmeabgabe durch die Luft die Badtemperatur von 878° jedenfalls etwas kürzere Zeit gewirkt als beim zweiten Versuch die tiefere Badtemperatur von 800°. Wenn also der Kamacit nach der Erhitzung 3 stärker verändert ist, so ist damit der Einfluß der Temperatur erwiesen. In der Tat ist beim Vergleich deutlich zu ersehen, daß nach der Erhitzung 3 die Linien bedeutend stärker verändert, undeutlicher geworden sind als nach der Erhitzung 6. Die

Körnung ist nach der Erhitzung 3 deutlicher entwickelt als nach der Erhitzung 6.

Der erhebliche Einfluß der Temperatur ist auch aus folgendem Versuche zu entnehmen.

7. Temperatur zirka 727° C. 4 Stunden lang im Luftbad erhitzt.

Nach dieser Erhitzung war trotz der langen Erhitzungsdauer die Veränderung an den Linien viel geringer als nach der Erhitzung 6 oder erst recht nach der Erhitzung 3. Die Körnung war im Entstehen begriffen, die Linien weniger als im

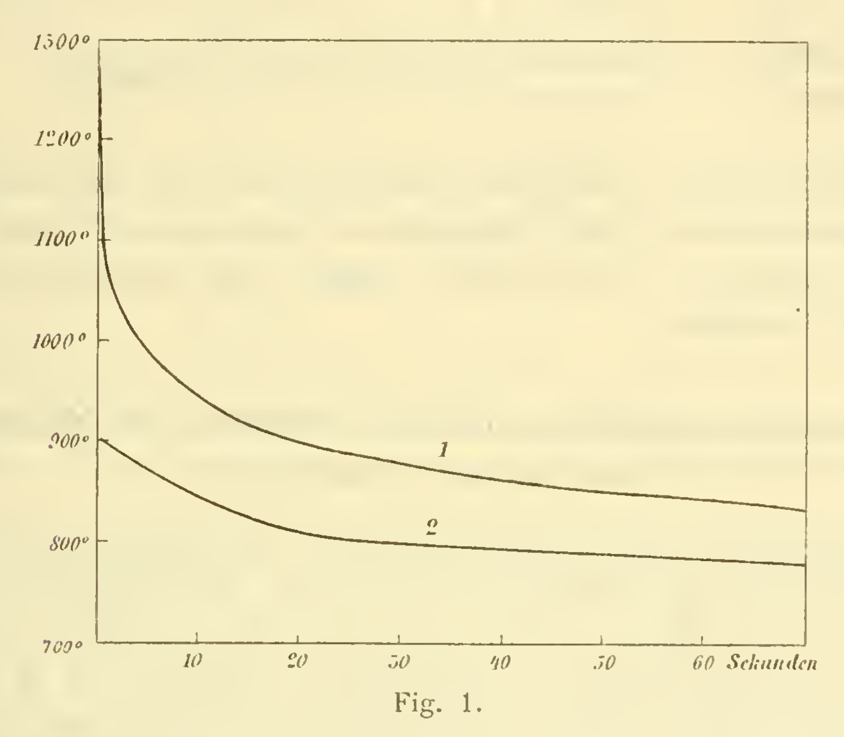


Fig. 1.

ursprünglichen Präparat und schmäler, aber noch viel deutlicher als nach der Erhitzung 6.

8. Temperatur zirka 592° C. 30 Minuten lang erhitzt. Veränderung geringfügig. An einer Stelle ist die Ätzung feiner und die Neumann'schen Linien werden hier undeutlicher.

Die Veränderungen, welche im Kamacit vor sich gehen, hängen von der Zeit und Temperatur ab. Die Temperaturen und Zeiten, bei denen die Veränderung vollständig wird, liegen auf einer Kurve, welche ungefähr den Verlauf der Kurve 1 (Fig. 1) hat. In analoger Weise können für gleiche Veränderungen des Kamacits Kurven konstruiert werden, die Zeiten und Temperaturen angeben, bei denen die Veränderung des

Kamacits um die Hälfte etc. vorgeschritten ist. Die Kurve, bei welcher die Neumann'schen Linien zur Hälfte verschwunden sind und die Körnung im Kamacit sich zu entwickeln beginnt, würde angenähert durch die Kurve 2 dargestellt werden. Die Versuchsresultate, auf Grund deren die beiden Kurven 1 und 2 (Fig. 1) entworfen wurden, sind folgende:

Temperatur	Zeit	
700°	240 Sekunden	Veränderung unvollständig
820	20 »	
900	1 Sekunde	
1100	2 Sekunden	Veränderung vollständig
1200	1 Sekunde	

Wir können annehmen, daß bei 1050° die Veränderung des Kamacits schon in 1 Sekunde vollständig wird und daß mit steigenden Temperaturen diese Zeit außerordentlich schnell abnimmt.

Die natürliche Brandzone und das Verhalten der Neumann-schen Linien in derselben.

Im Bereich der Brandzone, die ja bekanntlich ihre Entstehung der oberflächlichen Erhitzung des Meteoriten im irdischen Luftkreise verdankt, hat nur der Kamacit eine Veränderung oder gänzliche Umwandlung erfahren, die in einer von außen nach innen fortschreitenden Körnung besteht. In der Brandzone vorhandener Taenit, Schreibersit und auch vielfach Troilit sind in ihrem Bestand, wenigstens die beiden ersteren nicht nachweislich, während der atmosphärischen Erhitzung unverändert geblieben. Dagegen verschwinden bei vorgeschrittener Verwandlung des Kamacits die ihm eigenen sogenannten Neumann'schen Linien, wie dies einer von uns durch künstliche Erhitzung eines Tolucaeisens nachweisen konnte.[1] Dem Studium der Neumann'schen Linien haben Neumann, G. Rose, Tschermak, Sadebeck, Linck und Mügge

[1] F. Berwerth, Künstlicher Metabolit. Diese Sitzungsberichte, Bd. 114, Abt. I, p. 343.

eingehende Arbeit gewidmet. Die Beobachtungen der drei letztgenannten Forscher betreffen allerdings das Auftreten der Neumann'schen Linien auf Spaltflächen von künstlichem Eisen. Am meteorischen Eisen ist die Gelegenheit zur Beobachtung der Neumann'schen Linien im natürlichen Zustand auf Spaltflächen äußerst selten gegeben, wie dies z. B. auf Spaltstücken von Mount Joy in vorzüglicher Weise möglich ist. Von Linck und Mügge ist wohl endgültig festgestellt worden, daß den Neumann'schen Linien eine durch Gleitung entstandene Zwillingslamellierung nach sechs Flächenpaaren des Ikositetraeders (112) zugrunde liegt.

Zur Untersuchung des Meteoreisens dienen fast ausnahmslos polierte Schnittflächen. Auf diesen werden die Neumannschen Linien durch Ätzung hervorgerufen. Was wir als Neumann'sche Linien beobachten, ist eine von dicht aneinandergereihten Ätznäpfchen zusammengesetzte schmale Ätzrinne, entstanden auf dem Querschnitt einer auf der Schnittfläche austretenden Zwillingslamelle. Durch schmale, zum Teile niedergeätzte, zwischen den anstoßenden Näpfchen in mikroskopischer Form stehen gebliebene Querriegel erscheint die Ätzrinne gekammert, die also nur bei makroskopischer Draufsicht als ein stetiger Ätzstreifen erscheint. Je nach der Neigung der Zwillingsblätter zur Schnittfläche ändern die Ätzlinien ihre Breite. Auch die Stärke der Säure und die Dauer der Ätzung vermögen die Breite und Tiefe der Linien zu verändern. Starke Ätzung führt dann zur Form eines wurmförmig gegliederten Kanals. Scharfe Ätzungen sind jedoch zu vermeiden, da sie viele Feinheiten des Ätzbildes zerstören. Am kräftigsten kommen die Neumann'schen Ätzlinien in großen Kamacitindividuen (Hexaedriten) heraus, während sie in den Balkenkamaciten der Oktaedrite meist eine zartere Entwicklung aufweisen. Aus diesem Grunde, auch weil sie in größerer Längsentwicklung eine bessere Übersicht gewähren, empfiehlt es sich, das Verhalten der Ätzlinien in der Brandzone um so eher in massigen Kamaciten zu beobachten. Außerdem haben ihre Brandzonen auch eine ungestörtere Ausbildung erfahren als jene in den Balkenkamaciten der Oktaedrite.

Ein typisches Muster zur Beobachtung der Umwandlung des Kamacits in der Brandzone, mit der, wie schon oben bemerkt wurde, auch die Zerstörung der Neumann'schen Linien verbunden ist, liefert uns das Meteoreisen von Avče.

In der Ausbildung der Brandzone ist von außen nach innen eine Abstufung zu erkennen, die rundum im ganzen Bande gleich bleibt und nur mit dem Wechsel der Zonendicke sich parallel verschiebt. Am Außenrand läßt sich in ganz deutlicher Ausprägung ein dünner Streifen verfolgen, in dem eine solide Körnung des Kamacits Platz gegriffen hat. An Ausbuchtungen, besonders der Brustseite, verdickt sich die Schicht, während sie an der tiefsten Einbuchtung der Rückenseite kaum noch erkennbar ist.

Aus dieser gekörnten Randschicht sind die Neumannschen Linien vollständig verschwunden. Die Rhabdite haben bei der Umlagerung ihre frühere Lage nicht verändert. Nach innen entwickelt sich dann aus der gekörnten Zone durch Übergänge jener Zwischenzustand zwischen dem gekörnten und weniger stark veränderten Kamacit, dessen Ätzbild man als fetziges Aussehen bezeichnet hat. In diesem Zustand hat die Umwandlung des Kamacits kräftig eingesetzt, ist aber bei der betreffenden Temperatur nicht bis zur fertigen Körnung gediehen. Die von der Hitze angeregte Umwandlung schreitet nagend in den davon ergriffenen Kamacitpartien fort, zerfetzt sie an den Rändern, erzeugt bizarre Formen, ähnlich einem im Winde zerflatternden Wölkchen. Der Neukamacit ist sehr fein krystallin. Nach außen hin gewinnt diese mittlere Partie der Zone das Aussehen beginnender körniger Konsolidation, während sie gegen den Innenrand in eine gequollen aussehende Masse übergeht, ohne bestimmten Ausdruck, ein nebelhaftes Bild, aus dem wenige erhaltene Teile des Untergrundes hervortreten. Vornehmlich machen sich Teilstücke der Neumann'schen Linien geltend, die sich samt den angrenzenden Kamacitpartien erhalten haben. Die Linien sind selten in ihrer ganzen Kontinuität vorhanden, nur die Anreihung einzelner Ätznäpfchen im Verfolge einer im frischen Kamacit erhaltenen Linie macht sie als gut oder nur in Resten erhaltene Neumannsche Linien kenntlich. Nach dem Innenrand hin verfeinert sich

die Neustruktur, größere Reflexfelder verschwinden, dagegen erkennt man noch meistens genügend deutlich Spuren der alten Fensterstruktur, wie sie von den Linien im frischen Kamacit vorgezeichnet ist. Das Umwandlungsprodukt besteht hier aus staubig feinen, in der Hauptsache auch hier aus unregelmäßigen Körnchen. Der Innenrand der Brandzone scheint makroskopisch geradlinig gegen den frischen Kamacit abzuschließen. In Wirklichkeit schreitet aber die Umwandlung auf einer unebenen Fläche vor, die ihrerseits wieder gegen den frischen Kamacit nicht schneidig scharf abgrenzt, sondern sich in schwarmartigen Körnerhäufchen in den frischen Kamacit vorschiebt und beide an der Übergangsstelle eine schmale Mischzone erzeugen. An der Grenze der Brandzone setzen die Neumann'schen Linien fast durchwegs scharf ab.

Am Rande sind die Linien förmlich abgefressen und das von der Veränderung erfaßte Stück versinkt in schleierigen Körnerhaufen. Die Linien sind jetzt noch deutlich vorhanden und weniger zerstückelt als in der mittleren Zone. Das Ende der stehen gebliebenen Linien ist nach außen gerundet, seltener spießig und auch gerade abgeschnitten. In einem normalen Durchschnitt der Brandzone kommt also die schnelle Abnahme der Temperatur von außen nach innen in der Verschiedenartigkeit der Körnung zum Ausdruck. An dem zuhöchst erhitzten Außenrand verwandelt sich der Kamacit in eine gut großgekörnte Schicht, innerhalb der die Neumann'schen Linien vollständig restlos verschwunden sind. Gegen die Mitte vermindert sich die solide Körnung und geht in die fetzige Körnung über, mit Erhaltung vieler bruchstückartiger Reste der Neumann'schen Linien, um am Innenrand mit einer feinstkörnigen Zone abzuschließen, in der die Neumann'schen Linien noch keine weitgehende Zerstörung erfahren haben. An tiefen, schwach erhitzten, grubigen Stellen sind nur die beiden inneren Zonen vorhanden und die alterierten Neumann'schen Linien treten dann ganz nahe an die Oberfläche heran. Darnach hat die niedrigste Temperatur in der Brandzone unterhalb der grubigen Einsenkungen bestanden, wo die Neumann'schen Linien unmittelbar unter der Oberfläche noch gut erhalten sind. Diese geringe Veränderung im Zustande der Neumann-

schen Linien an eingesenkten Stellen der Oberfläche ist ein weiterer Beleg dafür, daß die Daubrée'sche Piezoglyptentheorie auf irrtümlichen Voraussetzungen aufgebaut war.

Als bemerkenswert ist noch hervorzuheben, daß die verschiedenen Liniensysteme bei der Umwandlung des Kamacits sich ungleich verhalten, da ein Liniensystem früher als die anderen in der Neubildung untergeht. Oft sind gerade schmale Liniensysteme noch vorhanden, während Systeme mit breiteren Linien ganz verschwunden sind. Beobachtungen in dieser Richtung haben ergeben, daß dies verschiedene Verhalten der einzelnen Systeme mit ihrer Lage zur Oberfläche zusammenhängt. Die senkrecht zur Oberfläche gestellten Systeme verfallen der Veränderung rascher als die zu ihr geneigt oder parallel verlaufenden Liniensysteme.

Die Brandzonen in Balkenkamaciten von Fundoktaedriten lassen von den oben in massigen Kamaciten geschilderten Verhältnissen keine wesentliche Abweichung erkennen. Die präparierten Platten älterer Zeit sind aber für die hier besprochenen Beobachtungen leider wenig geeignet. Überreste von Neumann'schen Linien wurden jedoch am Innenrand der Brandzone in den Eisen von Arlington, Crow Creek, Silver Crown, Thunda und Poopo aufgefunden.

Sehr bemerkbar macht sich in den Balkenkamaciten eine Erscheinung, die in den massigen Kamaciten nicht vorkommt. In fast allen Balkenkamaciten der Oktaedrite besteht nämlich der Kamacit nicht aus einem einzigen Individuum, sondern aus einem Aggregat gleichorientierter Teile. Gegenüber der Ätzung verhalten sich die netzartig verbundenen Absonderungsflächen zwischen den Teilen ganz gleich den Neumann'schen Linien und man wird versucht, die Zerklüftung der Balken ebenfalls auf mechanische Überanstrengung zurückzuführen. In diesem Falle müßte man also erwarten, daß die Ätzlinien auf den Kluftgrenzen der Kamacitkörner ebenso wie die Neumann'schen Linien mindestens in der körnig umgewandelten Außenrandschicht des Brandzonenbandes fehlen. Dies ist aber niemals der Fall. Im ganzen Querschnitt der Brandzone, selbst in der vollkommen gekörnten Außenschicht, ist das ganze Kluftnetz in Lage und Form unversehrt erhalten, wie es vor

der Umwandlung des Kamacits vorhanden war, so daß die Neubildung gleich einer Pseudomorphose ohne alle Einbuße an Schärfe in das alte Gefüge erfolgt ist.

Da das alte Kluftnetz ohne alle Ausnahme der Auflösung durch die Erhitzung widerstanden hat und das Gerüst für die Umgestaltung abgibt, so müssen die Absonderungsflächen zwischen den Teilen des Kamacits eine Entstehung ganz anderer Art haben als die Neumann'schen Linien. Jedenfalls wird man mechanische Überanspruchung nicht als Ursache des Kluftnetzes im unveränderten Kamacit in Anspruch nehmen können. Diese Widerstandsfähigkeit der Kluftflächen beim Umwandlungsprozeß in der Brandzone bestätigt das Vorhandensein einer dünnen Schicht von Zwischenmasse auf den Kluftflächen, welche im Kluftnetz des Quesaeisens am deutlichsten beobachtet wurde und auf deren allgemeines Vorkommen im Balkenkamacit früher[1] von einem von uns hingewiesen wurde. Aus Erfahrungen an Pallasiten, wo Troilithäute die Grenzzone zwischen Olivin und Eisen bilden, könnte man auch hier Troilit als solchen oder wenigstens als Hauptbestandteil der Zwischenmasse ansprechen. Es wäre auch möglich, daß diese Zwischenmasse Taenit ist, denn wir wissen auf Grund von Versuchen, daß der Nickelüberschuß aus dem Taenit in den Kamacit erst bei Temperaturen abzudiffundieren beginnt, bei denen der Kamacit schon in sehr kurzer Zeit sich stark verändert hat.

Breite der natürlichen Brandzonen.

Die bisher bekannt gemachten Messungen über die Breite der Brandzonen (siehe Cohen, Meteoritenkunde, I, p. 72) können nicht ohneweiters als Maßstab der Oberflächenerhitzung verwendet werden. Als Unterlage zu den Messungen haben durchwegs Brandzonen an zugeschnittenen Platten gedient, an denen gewöhnlich nur eine kurze Strecke der Brandzone vorhanden war und somit die Wahl der gemessenen Stelle dem Zufall überlassen war. Beobachtungen am Eisen von Quesa haben einem von uns ergeben, daß die Breite der

---

[1] F. Berwerth, Das Meteoreisen von Quesa (Ann. d. naturh. Hofmus., Bd. XXII [1909], p. 333 bis 334).

Brandzone vom Oberflächenrelief des Eisens abhängig ist, indem sie sich an erhabenen Stellen der Oberfläche verdickt und an vertieften Stellen verdünnt und auf der Brustseite wieder stärker ist als auf der Rückenfläche. Für die richtige Ausmessung der Dicke der Brandzone ist daher eine Schnittfläche anzulegen, die rundum von der natürlichen Oberfläche begrenzt ist. Auf allen solchen durch den ganzen Meteoriten gelegten Schnittflächen beobachtet man an sämtlichen höckerigen oder buckeligen Stellen je nach der Stärke der Ausbuchtung eine größere oder mindere, aber stets eine Verdickung der Brandzone und an vertieften oder eingebuchteten Stellen schrumpft sie je nach der Tiefe der Grube bis unterhalb 1 *mm* zusammen. Je höher ein Buckel sich über die mittlere Erhöhung der Oberfläche erhebt, desto stärker wird er erhitzt und am Grunde einer Grube erfährt die Oberfläche eine umso geringere Erhitzung, je tiefer die Grube unter dem Niveau der mittleren Tiefenlinie liegt. Zwischen der größten und kleinsten Breite der Brandzone wird man dann je nach der Unebenheit der Oberfläche viele oder nur wenige Verdickungen oder Verdünnungen mittlerer Größe finden und die Brandzone als ein Band beobachten, das gegen die Ausbuchtung anschwillt und sich gegen die Einbuchtungen hin verdünnt. Dieser Wechsel in der Brandzonendicke läßt sich an folgenden Meteoreisen zahlenmäßig feststellen. Am Quesaeisen wurde die Brandzone mit 9 und 6 *mm* auf der Brustseite und mit 6 und 4 *mm* auf der Rückenfläche gemessen. Das Gewicht des Eisens betrug 10 *kg*. Viel genauer läßt sich der Wechsel in der Dicke der Brandzone an dem neuester Zeit bekannt gewordenen Kamacit (Hexaedrit) von Avče verfolgen. Das Brandzonenband hat folgende Breiten in Millimetern: 4·8, 3·2, 3·0, 2·8, 2·5, 2·2, 2·0, 1·8, 1·0. Die größte Breite entspricht der stärksten Aus- und die kleinste der tiefsten Einbuchtung. Die zwischenliegenden Zahlen entsprechen flachen Aus- und Einbuchtungen der Oberfläche. Die größte Breite liegt gleichzeitig auf der Brustseite. Das Gewicht des Eisens ist 1230 *g*.

Die gleichen Breitenverhältnisse zeigt die Brandzone auf einer Platte des Kamacits (Hexaedrit) von Braunau längs einer natürlichen Kante: 2·2, 2·0, 1·8 und 1·3 *mm*. Auch hier

entsprechen die größeren Zahlen ausgebauchten und die niederen eingesenkten Oberflächenstellen. Das Gewicht des Braunaueisens beträgt 24 *kg*. Sehr stark macht sich der Unterschied in der Dicke der Brandzone auf einer Platte von Rowton geltend. An stark ausgewölbtem Rande hat die Brandzone eine Dicke von 6 *mm* und in einer tiefen Bucht schnürt sie sich auf 1·2 *mm* zusammen. Rowton wog 3·5 *kg*.

Von Mazapil ist der ganze natürliche Umfang einer Schnittfläche vorhanden. Die Dicke der Brandzone wurde gemessen mit: 9, 6, 5, 4, 3, 2·5, 2·2, 2·0, 1·8 *mm*. Das Gewicht von Mazapil betrug 4 *kg*.

An den übrigen im Falle beobachteten Eisen liegen die Bedingungen für die Messung der Breiten sehr ungünstig und können in diese Reihe nicht einbezogen werden. Auch an vielen sogenannten Fundeisen sind recht beträchtlich dicke Brandzonen erhalten. Dieselbe wurde an folgenden Stücken gemessen. An Platten von Poopo, Lonaconing und Bingera war der ganze Umfang der Brandzone vorhanden und an allen übrigen Platten waren nur Teilstrecken derselben erhalten. Die dicksten und dünnsten Stellen der Zone schwankten zwischen folgenden Zahlen in Millimetern: Arlington 6 und 0, Barrancablanca 2·5 und 0, Bingera 3 und 1·5, Crow Creck 8 und 2, Jewell Hill 6 und 1, Lonaconing 7 und 4, Merceditas 4 und 0, Nebraska 3 und 0, Nejed 2·2 bis 0·5, Poopo 8 und 1·5, Roebourne 6 und 2·5, Seneca 2 und 1, Silver Crown 5 und 1·5, Surprise Springs 7 und 2, Thunda 2·2 und 0. Diese Breitenmaße müssen als zufällige Größen angesehen werden, da uns die Dicke der Abwitterungsschichte gänzlich unbekannt ist. Das ist mit ein Grund, warum man der Aufstellung des Satzes von Cohen und Brezina, daß die Brandzonenbreite dem Gewicht des Meteoriten umgekehrt proportional sei, nicht zustimmen kann.

Zur Beobachtung der Dicke und überhaupt der Beschaffenheit der Brandzonen eignen sich am besten die Kamacite (Hexaedrite). An Oktaedriten vermögen die Taenitblätter und der Plessit die Fortpflanzung der Wärme zu beeinflussen.

Unterhalb eines an der Oberfläche und gleichzeitig am Grund einer Grube gelegenen Schreibersitkrystalls waren nicht

einmal Spuren einer Hitzewirkung sichtbar, ebenso unterhalb eines oberflächlich gelagerten Troilits.

Wählt man von den Messungen der Breite der Brandzone nur diejenigen, welche sich auf Meteorite beziehen, deren Brandzone noch vollständig erhalten ist, so erhält man folgende Tabelle:

Eisen von	Breite der Brandzone in Millimeter	Gewicht in Kilogramm	Mittlere Breite	$\frac{\text{Gewicht}}{\text{Mittlere Breite}}$
Quesa	9 —6	10	7·5	0·75
Avčc	4·8—1·0	1·2	2·9	2·4
Mazapil	9 —1·8	4	5·4	1·4
Braunau	2·2—1·3	24	1·7	0·07
Rowton	6 —1·2	3·5	3·6	1·0

Wäre die Behauptung von Cohen und Brezina[1] richtig, daß die Breite der Brandzone umgekehrt proportional dem Gewicht des Meteoriten sein soll, so müßte der Quotient: Gewicht dividiert durch mittlere Breite, konstant sein. Der von Brězina vermutete Zusammenhang zwischen der Breite der Brandzone und dem Gewicht wird also durch die Erfahrung nicht bestätigt. Aber auch theoretisch ist dieser Zusammenhang nicht zu erwarten. Aus der Theorie der Wärmeleitung ergibt sich für das Eindringen der Wärme in einen kalten Körper, dessen Oberfläche auf konstanter Temperatur gehalten wird, daß die Zeiten z, bei denen dieselben Temperaturen in Punkten verschiedener Abstände b von der Oberfläche des Körpers erreicht werden, sich wie die Quadrate dieser Abstände verhalten, daß also die Beziehung: $z_1 : z_2 = b_1^2 : b_2^2$ gilt.

Wenden wir diesen Satz auf die Brandzone an und nehmen wir für die Brandrinde bei verschiedenen Meteoriten dieselbe konstante Temperatur, den Schmelzpunkt des Nickeleisens, an, welche von dem Nickelgehalt des Meteors sehr wenig beeinflußt wird, und auf der Berührungsfläche zwischen Brandzone und dem unveränderten Meteoreisen ebenfalls eine

[1] E. Cohen, Meteoritenkunde, I, p. 72 (1894).

fast konstante Temperatur, dann müssen bei verschiedenen Meteoren die Dicken der Brandzonen *b* sich wie die Quadratwurzeln aus den Zeiten *z* verhalten, während deren die konstante hohe Temperatur an der Oberfläche herrschte. Diese Zeiten werden nur wenig kürzer sein, als die Zeiten, während deren das Meteor am Himmel erglänzt. Je breiter also die Brandzone ist, um so länger hat das Meteor geleuchtet, um so schiefer ist ceteris paribus seine Bahn zum Horizont gewesen.

Versuche, die Brandzone künstlich zu erzeugen.

Sucht man die Brandzone in der Weise zu erzeugen, daß man Stücke von Kamacit von 8·0 und 10·5 *g* Gewicht 1 bis 3 Sekunden lang in ein Chlorcalciumbad von 1200° C. taucht, so hat die Veränderung des Kamacits, welche man auf einer Schnittfläche durch das Stück beobachtet, schon das ganze Stück ergriffen; der Kamacit ist dann sehr deutlich gekörnt und die Neumann'schen Linien sind vollständig verschwunden.[1] Dieses Verfahren zur Erzeugung einer Brandzone führt nicht mit Sicherheit zum Ziel, weil die Zeit, während welcher der Kamacit zu erhitzen ist, so gering ist, daß man die richtige Zeit zur Erzeugung einer Brandzone nicht leicht trifft. Außerdem beobachtet man in der Regel bei den Kamacitstücken (von Mount Joy), daß an der Begrenzung der Schliffläche die Ätzung viel schwächer als in der Mitte ist, so daß sogar die Neumann'schen Linien häufig nicht bis an den Rand der Schlifffläche herantraten oder in dieser Randzone undeutlicher wurden. Durch das Schleifen selbst wird also der Rand der Schlifffläche in einer Weise verändert, welche, wenn man die Erhitzungsversuche in der oben erwähnten Weise vornahm, leicht zu Verwechslungen führen könnte.

Daher wurden die Versuche in der Weise abgeändert, daß sie in jedem Falle zu einem Resultat führen mußten. Zu den Versuchen wurde ein Kamacit von Mount Joy, welcher in

[1] Bei diesen Versuchen wurde mehrmals beobachtet, daß sich beim Eintauchen des Kamacits in das geschmolzene Chlorcalcium Gasblasen entwickelten, welche über dem Chlorcalcium mit leuchtender Flamme brannten.

besonders schöner Weise die Neumann'schen Linien in drei verschiedenen Richtungen erkennen ließ, in Stäbchen geschnitten. Ein solches Stäbchen wurde dann teilweise mit feuchtem Asbestpapier umwickelt, mit einem Draht verbunden und sein freies Ende im Knallgasgebläse bis zum Schmelzen des Kamacits erhitzt. Nachdem die so behandelten Stücke poliert und 3 Minuten lang in dreiprozentiger HNO_3 geätzt waren, konnte man schon makroskopisch drei verschiedene Schichten deutlich voneinander auf ihnen unterscheiden:

1. Die geschmolzene graue Schicht von feinkörnigem Gefüge, aus der der Rhabdit als ursprünglicher verschwunden war und welche aus kleinen Polyedern, ganz ähnlich wie das technische Nickeleisen, besteht. Im Meteoreisen von Avče besteht die Brandrinde aus einem Konglomerat von Körnern der Oxyde und vereinzelten in dieser Grundmasse eingesprengten Partikeln des Eisens (siehe auch Fig. 4), die an der Grenze zwischen der Brandzone und der Brandrinde häufig die Form von dünnen Lamellen annehmen.

Auch die künstliche Brandrinde besteht aus einer gekörnten Grundmasse der Oxyde mit zahlreichen Eisenpartikeln. Die mit dem Leuchtgas-Sauerstoffgebläse am Kamacit von Mount Joy hergestellte Brandrinde enthielt erheblich mehr Eisenpartikeln als die natürliche Brandrinde des Eisens von Avče. Die natürliche Brandrinde war aber auch dicker als die künstlich hergestellte, es hatte der Oxydationsprozeß an der natürlichen Brandrinde also länger gedauert als an der künstlichen, worauf wohl der Umstand, daß die natürliche Brandrinde ärmer an metallischem Eisen ist als die künstliche, zurückzuführen ist.

2. Eine breitere Schicht, in der die zueinander senkrecht orientierten Rhabditnadeln vollständig erhalten sind, in der aber, besonders nach der Schmelzzone hin, eine ziemliche Grobkörnung aufgetreten ist; diese Körnung wurde in der Richtung von der Schmelzzone immer undeutlicher. Die Lage der Ätznäpfchen auf dieser Fläche ist ganz unregelmäßig, wodurch sich schon mit bloßem Auge diese Zone von der nächsten, unveränderten deutlich unterscheidet.

3. Auf der unveränderten Fläche sind die Neumann'schen Linien vollständig intakt erhalten und brechen an der Grenz-

fläche der unveränderten und der künstlich erzeugten Brandzone auf einer geraden Linie ab, indem sie sich beim Abbrechen zum Teil etwas zuspitzen und der ihnen entsprechende tief geätzte Kanal flacher wird. Es kommt nur sehr selten vor, daß eine besonders tief und breit geätzte Neumann'sche Linie die Gerade, welche die Enden der übrigen Neumann'schen Linien verbindet, überschreitet. Eine künstliche Brandzone kann man unter ganz ähnlichen Verhältnissen, wie die natürliche entstanden ist, erzeugen, indem man nämlich einen genügend heißen Gasstrom auf die Oberfläche des Kamacits leitet.

Die Grenze der künstlichen Brandzone und des unveränderten Kamacits ist in den Fig. 1 und 2, Taf. I, in 68facher und 24facher Vergrößerung aufgenommen. Fig. 3 gibt die Grenze der natürlichen Brandzone zum unveränderten Kamacit im Meteoreisen von Avče wieder und Fig. 4 zeigt die Grenze zwischen der Brandrinde und der Brandzone ebenfalls im Eisen von Avče.

Göttingen und Wien, Oktober 1910.

F. Berwerth und **G. Tammann**: Brandzone der Meteoreisen.

Fig. 1

Fig. 2

Vergrößerung 24 ×

Vergrößerung 68 ×

Fig. 1 u. 2: Künstliche Brandzone am Meteoreisen v. Mt. Joy.

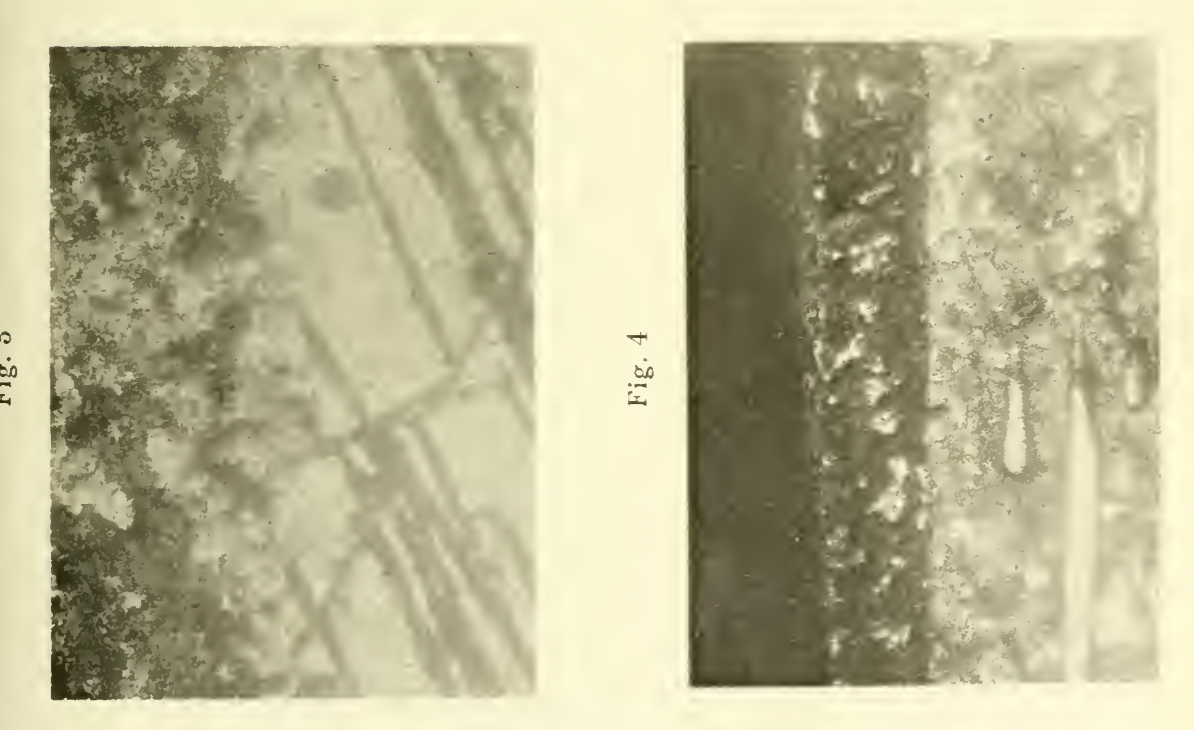


Fig. 3

Fig. 4

Fig. 3 u. 4: Meteoreisen von Avče, Vergr. 68 ×

3. Grenze zwischen Brandzone und unverändertem Kamacit.

4. Grenze zwischen der Brandrinde und der Brandzone.

Lichtdruck v. Max Jaffé, Wien.